

# AZ31 镁合金板材连续挤压工艺的实验研究

郭丽丽<sup>1</sup>, 符蓉<sup>1</sup>, 裴久杨<sup>1</sup>, 杨俊英<sup>1</sup>, 宋宝韞<sup>1,2</sup>

(1. 大连交通大学 连续挤压教育部工程研究中心, 辽宁 大连 116028)

(2. 大连康丰科技有限公司, 辽宁 旅顺 116045)

**摘要:** 利用连续挤压技术的单、双杆进料方法实验生产了尺寸 (宽×厚, 下同)为 160 mm×8 mm, 170 mm×4 mm 和 160 mm×3 mm 的 AZ31 镁合金板材。分析了单、双杆进料方式, 不同宽/厚比和不同挤压速度等条件对镁合金板材横截面微观组织及力学性能的影响。讨论了应用双杆进料连续挤压工艺生产 AZ31 镁合金宽薄板的工艺可行性。结果表明: 与单杆进料相比, 双杆进料方式的连续挤压 AZ31 镁合金板材横截面微观组织均匀性较好, 板材平均抗拉强度可达到 239 MPa, 平均延伸率为 15%。宽/厚比由 20 增加到 53, 可获得晶粒尺寸 5 μm 的细晶镁合金板材。随挤压轮转速提高, 板材抗拉强度降低, 这是由于温度升高导致晶粒尺寸变大所致。

**关键词:** 连续挤压; 镁合金板材; 力学性能; 微观组织

**中图分类号:** TG376; TG146.2<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)06-1626-06

镁合金板带材作为最轻的金属结构材料在航空航天、汽车制造、机械制造和 3C 产品等领域有广泛的应用前景<sup>[1,2]</sup>。目前, 镁合金板材的生产主要有以下 3 种方法: 铸锭热轧开坯法、挤压开坯轧制法和双辊铸轧法<sup>[3-5]</sup>。在镁合金的生产历史中, 铸锭热轧开坯法是最早开发的板材制备方法, 而后为提高镁合金板材的成型性, 开发了挤压-轧制法。双辊铸轧法是近十几年开发出来的一种短流程新工艺, 和以上 2 种传统方法相比, 可以提高生产效率, 节约成本, 然而存在氧化夹杂难以去除, 板材表面质量和性能难以控制的缺陷<sup>[6]</sup>。此外, 由于镁合金具有 hcp 晶体结构, 和室温塑性变形困难的特点, 加热工序必不可少, 使生产成本增加, 导致目前镁板市场价格居高不下<sup>[7]</sup>。连续挤压技术可通过摩擦生热使挤压坯料温度升高, 实现室温送料连续化生产, 与传统板材加工工艺比较, 可减少能量消耗, 简化生产工艺, 提高生产效率<sup>[8,9]</sup>。因此, 镁合金板材连续挤压成型工艺的研究和实践具有重要意义, 但目前尚没有应用连续挤压方法生产 AZ31 镁合金板材的实践报道。本工作主要利用连续挤压技术的单、双杆进料方法在不同挤压速度下实验生产出尺寸为 160 mm×8 mm, 170 mm×4 mm 和 160 mm×3 mm 的 AZ31 镁合金板材样品, 分析了板材的组织均匀性, 晶粒细化效果和力学性能, 讨论了应用双杆进料连续挤压工艺生产 AZ31 镁合金板材的可行性, 以为连续挤压技术生产 AZ31 镁合金宽薄板材提供依据。

## 1 实验

图 1a 为单杆进料连续挤压原理图。挤压轮在驱动力作用下沿图示方向作旋转运动, 在挤压轮圆周上有一环形沟槽, 模腔内表面工作圆弧与挤压轮的外圆表面相吻合、模腔上的挡料块与挤压轮的沟槽相吻合, 构成密封的流动通道。坯料在压实轮和驱动轮的摩擦力作用下被连续送入由挤压轮沟槽和模腔内表面构成的挤压腔, 坯料在腔体挡料块前面沿圆周运动受阻, 因此只能进入模腔, 然后通过装在模腔内的扩展模和模具挤成所需的产品<sup>[10]</sup>。图 1b 为双杆送料连续挤压生产示意图。与单杆送料不同的是挤压轮上设置两个并行的沟槽, 将杆料导入到模腔内产生挤压扩展变形, 在一定的温度压力下焊合后再通过模具形成板材。

图 2a 为外购  $\Phi 15$  mm 的正挤压 AZ31 镁合金杆料。利用 TLJ400 连续挤压机和单、双杆进料方式进行镁合金板材的连续挤压实验, 生产出的 AZ31 镁合金板材如图 2b 所示。应用不同扩展模和挤压模具试生产出板材的尺寸分别为 160 mm×8 mm, 170 mm×4 mm 和 160 mm×3 mm。单杆进料实验中设定挤压轮转速分别为 4, 5, 6, 7, 8 r/min, 双杆进料实验中挤压轮的转速为 4, 5, 6, 7 r/min。挤压工艺条件和对应的板材尺寸详见表 1。

收稿日期: 2016-05-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (51401043)

作者简介: 郭丽丽, 女, 1974 年生, 博士, 副教授, 大连交通大学连续挤压教育部工程研究中心, 辽宁 大连 116028, 电话: 0411-84106527, E-mail: guolili0822@hotmail.com

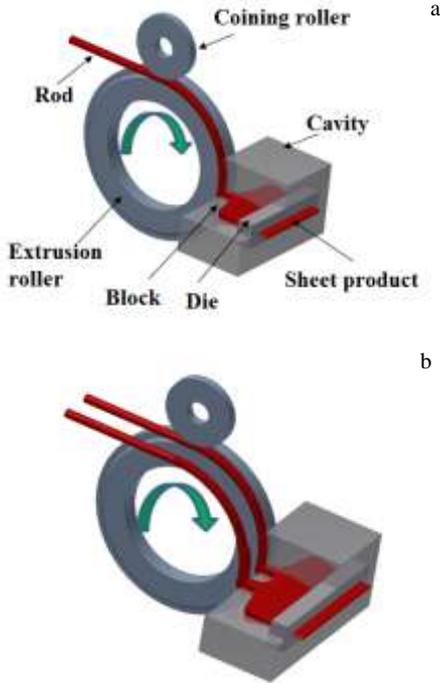


图 1 单杆进料和双杆进料连续挤压示意图

Fig.1 Schematic diagram of the continuous extrusion with the single rod (a) and the double rod (b)

表 1 连续挤压工艺条件和板材外观尺寸

Feeding mode	Width× thickness/mm	Extrusion speed/r min <sup>-1</sup>	Appearance quality
Single rod	160×8	4	Good flatness and no edge crack
	170×4	4, 5, 6, 7	Good flatness and no edge crack
Double rod	160×8	4, 5, 6, 7, 8	Surface oxidation
	160×3	1	Wave bending

为分析不同挤压工艺条件下的板材质量,在板材横截面的中间和边部取样,观察产品微观组织,并在相应位置取拉伸试样,进行力学性能测试。将板材横截面所取试样进行研磨、抛光、腐蚀,用 OLYM-PUS-BX41M 金相显微镜对 AZ31 镁合金板材进行微观组织观察。拉伸试验在 AG-IC100KN 电子万能材料试验机上进行,弹性变形阶段拉伸速率为 3 mm/s,塑性变形阶段拉伸速率为 10 mm/s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 连续挤压的镁合金板材

图 3 为连续挤压实验生产的镁合金板材样品。图 3a, 3b 分别为单、双杆进料 160 mm×8 mm 的板材样

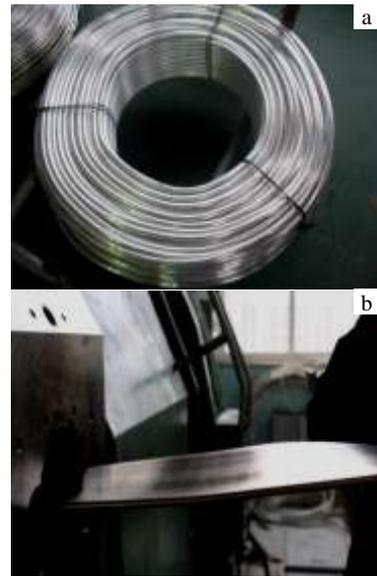


图 2 外购  $\Phi 15$  mm 的 AZ31 挤压杆料和挤出的板材  
Fig.2 Purchased extruded AZ31 magnesium rod with  $\Phi 15$  mm in diameter (a) and continuous extruded magnesium sheet (b)

品。板材平直度和表面质量较好,边部无裂纹、起皮等缺陷。图 3b 板材样品表面颜色较深,呈现严重氧化现象。这是由于双杆进料在成型过程中模腔内的挤压力较大,导致成型温度升高所致。图 3c 为单杆进料 170 mm×4 mm 的板材,其表面质量和平直度较好。图 3d 为双杆进料实验生产的 160 mm×3 mm 镁合金板材,由于板材较薄,部分存在波浪式弯曲,尚未完好成型。

### 2.2 单杆进料微观组织

图 4a, 4b 分别为单杆进料 160 mm×8 mm 试样横截面中心和边部的微观组织。由图 4a 可见,中心由细小等轴晶粒组成,由于此处对应杆料的进料口处,坯料在模腔内的高温高压作用下,容易达到完全动态再结晶条件,晶粒细化效果较好<sup>[11,12]</sup>。由图 4b 可见,板材的边部由粗大的晶粒组成,内部分布着很多孪晶。图 4c,4d 分别表示 170 mm×4 mm 板材横截面的中心和边部的微观组织。和 160 mm×8 mm 的板材相比,170 mm×4 mm 板材样品的组织分布更均匀,中心和边部微观组织差异不大,横截面各处均出现了不同程度的动态再结晶,但是晶粒大小由中间到边部递减,而且板材边部晶粒更加细小均匀。单杆进料连续挤压的 AZ31 镁合金板材微观组织分布的成因为:一是连续挤压成型过程中板材中间温度高于边部,导致中间位置晶粒长大。二是边部存在较大剪切变形能够提高动态再结晶程度,从而获得较好的晶粒细化效果<sup>[13,14]</sup>。

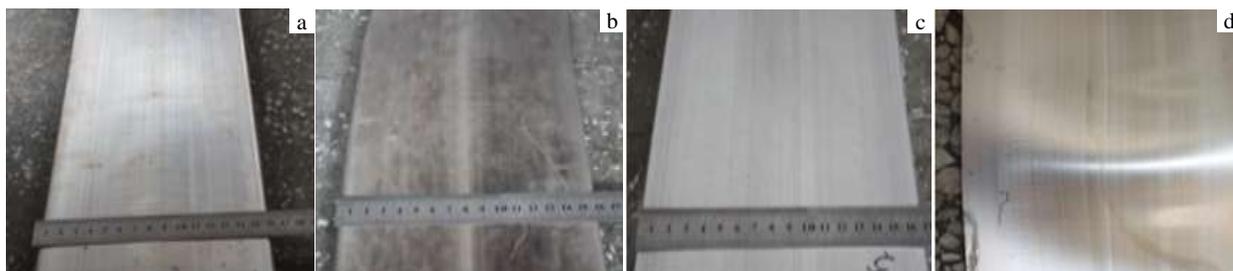


图 3 单、双杆进料连续挤压镁板材样品

Fig.3 Samples of magnesium sheets processed by the continuous extrusion with the single and double rod modes: (a) single rod 160 mm×8 mm, (b) double rod 160 mm×8 mm, (c) single rod 170 mm×4 mm, and (d) double rod 160 mm×3 mm

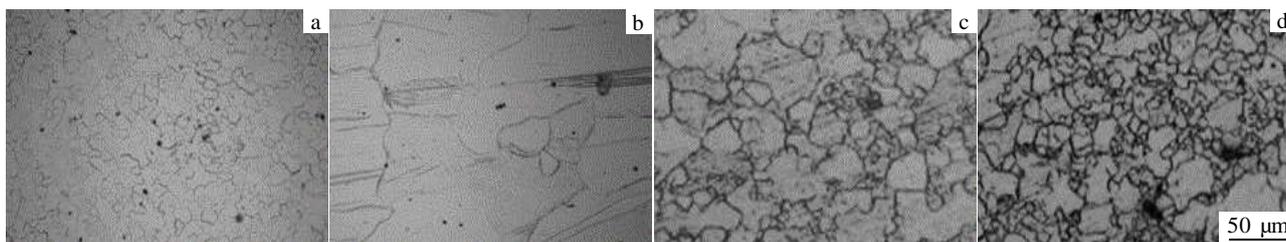


图 4 单杆进料连续挤压 AZ31 镁合金板材横截面光学微观组织

Fig.4 Microstructures of the cross-section of AZ31 magnesium sheets processed by the continuous extrusion with the single rod mode: (a) center and (b) edge of the sheet with size of 160 mm×8 mm; (c) center and (d) edge of the sheet with size of 170 mm×4 mm

比较单杆进料镁合金板材连续挤压工艺可知，板材的宽厚比由 20 增加到 42.5,可以在很大程度上提高板材横截面的组织均匀性。

### 2.3 双杆进料微观组织

图 5a, 5b 分别为双杆进料 160 mm×8 mm 连续挤压镁合金板材中心和边部的横截面光学微观组织照片。与单杆进料连续挤压的相同尺寸板材横截面相比，近中心和边部位置微观组织均匀性有明显提高，边部可见少量孪晶组织。图 5c, 5d 分别为双杆进料 160 mm×3 mm (宽厚比为 53.3) 板材横截面近中心和边部的光学微观组织。可见板材横截面几乎达到完全动态

再结晶，但是由于挤压变形中温度和应力分布不均，导致中心区域和边部区域的动态再结晶的程度不同，晶粒大小也有明显差异。板材边部出现了极为均匀的细晶组织，平均晶粒尺寸约为 5 μm。由此可见，双杆进料连续挤压的镁合金板材，宽/厚比由 20 增加到 53.3，横截面的晶粒细化程度得到显著提高。

### 2.4 双杆进料焊合区的孪晶

由于双杆进料在挤压成型过程中存在金属汇流，所以板材横截面中间位置会出现焊合区，此区域的微观组织如图 6 所示。图 6a 为双杆进料 160 mm×8 mm 板材的焊合区微观组织。可见中间呈现纵向条纹，边

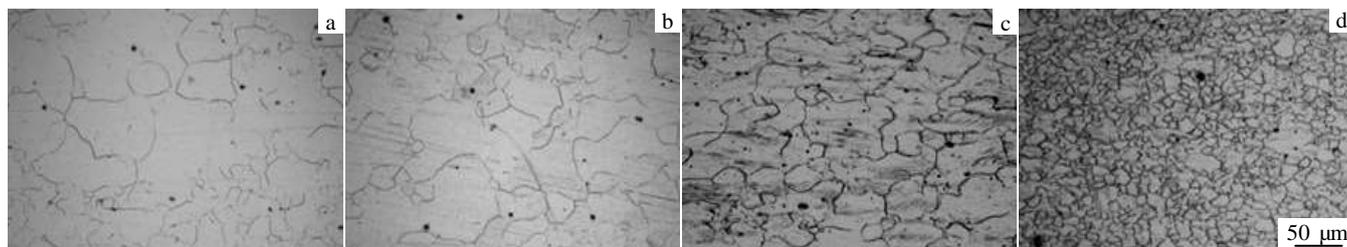


图 5 双杆进料连续挤压镁合金板材横截面微观组织

Fig.5 Microstructures of the cross-section of AZ31 magnesium sheets processed by the continuous extrusion with the double rod mode: (a) center and (b) edge of sheet with size of 160 mm×8 mm; (c) center and (d) edge of sheet with size of 160 mm×3 mm

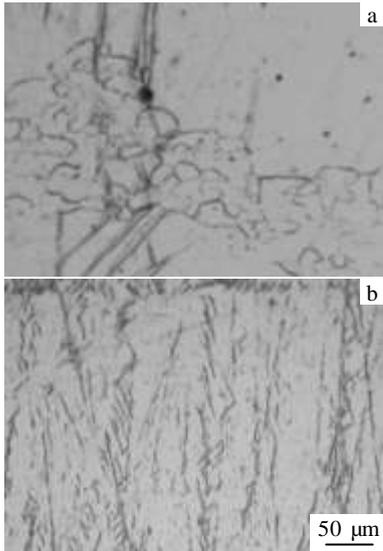


图 6 双杆进料连续挤压镁合金板材焊合区的孪晶组织

Fig.6 Twins in the welding areas of the magnesium sheets processed by continuous extrusion with double rod mode: (a) 160 mm×8 mm and (b) 160 mm×3 mm

部分布着很多细晶组织和没有发生动态再结晶的粗大组织, 纵向条纹由很多细密的孪晶组成, 故可称为孪晶带。160 mm×3 mm 板材的焊合区也由很多这样的孪晶带组成, 见图 6b。图 7 表示了镁合金中常见的 3 种孪晶, 分别为  $\{10\bar{1}2\} <10\bar{1}1>$  拉伸孪晶,  $\{10\bar{1}1\} <10\bar{1}2>$  压缩孪晶和  $\{10\bar{1}2\} + \{10\bar{1}1\}$  二次孪晶。一般而言, 孪晶带的成因如下: 由于连续挤压的镁合金坯料为挤压杆料, 具有丝织构, 此方向的晶粒在焊合过程中  $c$  轴受拉应力 (侧面受压应力) 时, 就会形成  $\{10\bar{1}2\} <10\bar{1}1>$  ( $86.3^\circ <11\bar{2}0>$ ) 孪晶, 反之就会形成  $\{10\bar{1}1\} <10\bar{1}2>$  ( $56^\circ <11\bar{2}0>$ ) 孪晶<sup>[15]</sup>。在连续挤压过程中, 焊合区处于板材的中间位置, 晶体侧面受压应力的可能性较大, 因此可以初步认为此孪晶带由  $\{10\bar{1}2\} <10\bar{1}1>$  ( $86.3^\circ <11\bar{2}0>$ ) 孪晶构成。当然, 焊合区的孪晶类别还有待进一步深入研究。另一方面, 板材边部孪晶有别于焊合区的孪晶成因, 边部由于存在粗晶区, 组织异常粗大, 约为 80~100  $\mu\text{m}$ , 加之边部位置的成型温度低于中间, 故挤压变形中容易形成孪晶, 用以缓解镁合金塑性变形过程中滑移系不足的缺点<sup>[16,17]</sup>。

### 2.5 挤压速度对板材力学性能的影响

图 8 为连续挤压 AZ31 镁合金板材的力学性能随挤压轮转速的变化情况。由图 8a 可知, 单杆进料连续挤压的 170 mm×4 mm 板材的抗拉强度随着挤压轮转速的增加而降低, 但延伸率却呈相反的趋势, 如图 8b 所示。

板材中心和边部抗拉强度和延伸率差异较大, 抗拉强度相差 20~30 MPa, 延伸率相差 6%~10%。图 8c 为双杆进料 160 mm×8 mm 的板材抗拉强度随挤压轮转速的变化曲线。随挤压轮转速的增加, 中心和边部试样抗拉强度逐渐降低, 产品边部的强度高于中心位置 10 MPa 左右, 延伸率低于边部试样约 5%, 如图 8d 所示。由此可见, 和单杆进料相比, 双杆进料方式可以使 AZ31 镁合金板材横截面组织均匀, 综合力学性能得以提高。连续挤压工艺生产 AZ31 镁合金板材, 挤压轮转速提高, 板材强度下降。这是由于随着挤压轮转速的升高, 单位时间模腔内金属的变形量增加, 即变形速率增加, 从而导致变形发热量增大, 造成动态再结晶的晶粒尺寸变大, 板材强度会降低。

### 2.6 板材纵向和横向力学性能

表 2 列出了连续挤压 AZ31 镁合金板材的纵向 (ED) 和横向 (TD) 力学性能。可见板材横向力学性能均低于纵向。同样尺寸的 160 mm×8 mm 的板材, 双杆进料方式得到的产品强度和延伸率都高于单杆进料产品。在同样送料速度下, 双杆进料在挤压过程中静水压力较大, 动态再结晶程度较高, 组织均匀性较好, 因此可以得到性能较好的产品。增大宽/厚比, 能够提高板材的抗拉强度和延伸率。其中, 单杆进料 170 mm×4 mm 镁合金板材在转速 4 r/min 时平均抗拉强度 220 MPa, 平均延伸率为 14.5%; 160 mm×3 mm 双杆进料的产品, 板材横向抗拉强度可以达到 256 MPa, 延伸率为 15.9%。

由于挤压产品存在各向异性, 所以板材的横向力学性能均低于挤压方向。另外, 双杆进料的 AZ31 镁合金板材样品, 横向拉伸试样的断口不在中心的焊合区, 如图 9 所示。说明模腔内焊合区的温度压力条件达到金属的冶金连接条件, 焊合区的性能超过了母材的性能。由此可知, 连续挤压的双杆进料方法可能会成为生产 AZ31 镁合金板材的一种新技术、新方法, 并有望成为迄今为止最节能的镁合金板材生产方法。

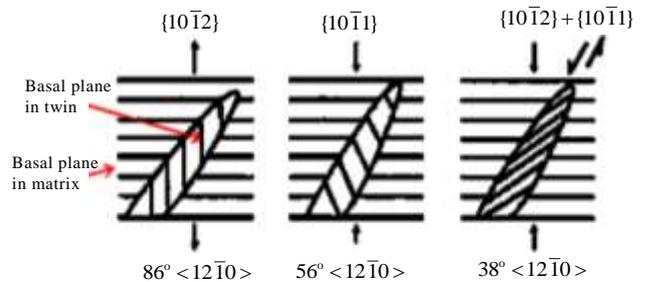


图 7 镁合金中的 3 种孪晶

Fig.7 Three types of twin in magnesium alloys

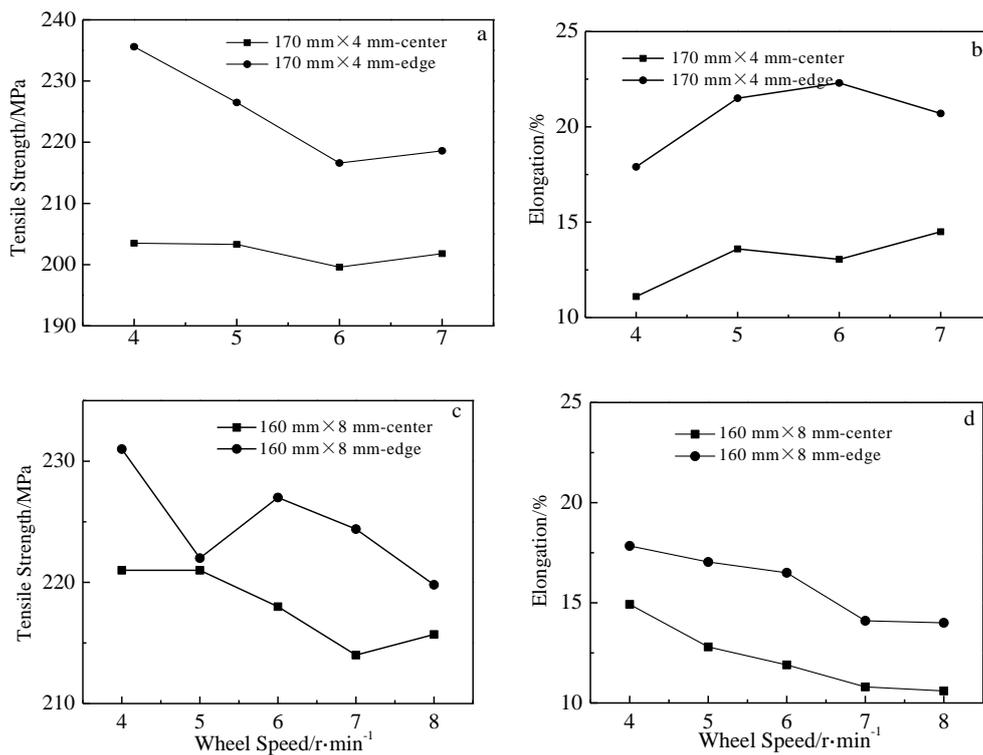


图 8 挤压轮转速对镁合金板材力学性能的影响

Fig.8 Influence of the wheel speed on the mechanical properties of AZ31 magnesium sheets: tensile strength (a) and elongation (b) for single rod mode; tensile strength (c) and elongation (d) for double rod mode

表 2 连续挤压 AZ31 镁合金板材的纵向、横向力学性能

Table 2 Mechanical properties of AZ31 magnesium sheets processed by continuous extrusion in extruded direction (ED) and transverse direction (TD)

Feeding mode	Width × thickness/mm	Wheel speed/ r min <sup>-1</sup>	Extruded direction (ED)		Transverse direction (TD)	
			Tensile strength/ MPa	Elongation/%	Tensile Strength/ MPa	Elongation/%
Single rod	160 × 8	4	191	16	189	—
	170 × 4	4	220	14.5	190	11
Double rod	160 × 8	4	239	15	209	10.3
	160 × 3	1	—	—	256	15.9



图 9 双杆进料的镁合金板材垂直于挤压方向试样断口位置  
Fig.9 Fracture positions of the samples in TD of the magnesium sheets processed by the double rod mode

### 3 结 论

1) 单杆进料的连续挤压 AZ31 镁合金板材横截面微观组织分布不均; 增加板材的宽/厚比, 板材横截面的组织均匀性和晶粒细化程度会显著提高。双杆进料的 AZ31 镁合金板材横截面微观组织均匀性较好, 板材的宽厚比由 20 增加到 53, 可以得到晶粒尺寸 5 μm 的细晶镁合金板材。

2) 单杆进料的 170 mm × 4 mm AZ31 镁合金板材, 当挤压轮转速为 4 r/min 时, 板材平均抗拉强度为 220

MPa, 平均延伸率为 14.5%。双杆进料 160 mm×8 mm AZ31 镁合金板材, 当挤压轮转速约为 4 r/min 时, 板材的平均抗拉强度达到 239 MPa, 延伸率为 15%。

3) 随挤压轮转速的升高, 板材强度会有所降低, 这是变形温度升高导致板材晶粒尺寸增大所致。

#### 参考文献 References

- [1] Zhang Shihong(张士宏), Xu Yi(许沂), Wang Zhongtang(王忠堂) *et al.* *World Sci-Tech R&D*(世界科技研究与发展)[J], 2007, 23(6): 18
- [2] Pan Fusheng(潘复生), Han Enhou(韩恩厚). *Wrought Magnesium Alloys with High Properties and Manufacturing Technology*(高性能变形镁合金及加工技术)[M]. Beijing: Science Press, 2007
- [3] Han Chen(韩晨), Sun Futao(孙付涛). *Shanghai Nonferrous Metals*(上海有色金属)[J], 2015, 36(2): 85
- [4] Han Chen(韩晨). *Nonferrous Metals Processing*(有色金属加工)[J], 2015, 44(4): 1
- [5] Liu Guojun(刘国钧), Xu Jun(徐骏), Yang Liuqing(杨柳青). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2012, 36(3): 477
- [6] Ding Yunpeng(丁云鹏), Cui Jianzhong(崔建忠), Yue Qizhi(乐启焱) *et al.* *Journal of Net Shape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2014, 6(6): 7
- [7] Guo Lili(郭丽丽), Li Yongbing(李永兵), Zhang Xiaosong(张晓嵩) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2016, 23(5): 29
- [8] Yang Rubai(杨如柏), Zhang Shenghua(张胜华). *Continuous Extrusion Forming Translations*(连续挤压译文集)[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1989
- [9] Yun Xinbing(运新兵), Song Baoyun(宋宝韞), Gao Fei(高飞). *Metal Forming Technology*(金属成形工艺)[J], 2002, 20(3): 46
- [10] Fan Zhixin(樊志新), Song Baoyun(宋宝韞), Liu Yuanwen(刘元文) *et al.* *Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2007, 17(2): 283
- [11] Li luoxing(李落星), Zhou Jia(周佳), Zhang Hui(张辉). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2012, 48(18): 35
- [12] Zhang Xing(张星), Li Baocheng(李保成), Zhang Zhimin(张治民). *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2004, 11(3): 52
- [13] He Yunbin(何运斌), Pan Qinglin(潘清林), Tan Yinjiang(覃银江) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(6): 1205
- [14] Jonas J J, Queleennec X, Jiang L *et al.* *Acta Materialia*[J], 2009, 57(9): 2748
- [15] Li Yunping, Wu Shuo, Bian Huakang *et al.* *Script Materialia* [J], 2013, 68(3-4): 171
- [16] Mao Pingli(毛萍莉), Liu Chao(刘超), Liu Zheng(刘正). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(5): 1181
- [17] Wang Zhongtang(王忠堂), Yan Cao(严操), Song Guangsheng(宋广胜) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 221

## Experimental Studies on AZ31 Magnesium Sheets Processed By Continuous Extrusion

Guo Lili<sup>1</sup>, Fu Rong<sup>1</sup>, Pei Jiuyang<sup>1</sup>, Yang Junying<sup>1</sup>, Song Baoyun<sup>1,2</sup>

(1. Engineering Research Center of Continuous Extrusion, Ministry of Education, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

(2. Dalian Conform Technology Co., Ltd, Lvshun 116045, China)

**Abstract:** The magnesium sheets with size (width and thickness) of 160 mm×8 mm, 170 mm×4 mm and 160 mm×3 mm were processed experimentally by a continuous extrusion method with single and double rod modes. The influences of the process conditions, including feeding modes (single and double rod), width/thickness ratio and extrusion speed on the forming abilities, the microstructure distributions and the mechanical properties of the AZ31 magnesium sheets were examined. Results show that the sheets processed by the double rod mode exhibit more homogeneous microstructure distributions in cross-section than the sheets processed by the single rod mode. The average tensile strength is up to 239 MPa and the average elongation is 15%. The magnesium sheets with refined grains are obtained when the width/thickness ratio is improved from 20 to 53. The tensile strength of AZ31 sheets decreases with increasing the wheel speed because higher temperature generally leads to larger grain size.

**Key words:** continuous extrusion; AZ31 magnesium sheets; mechanical properties; microstructure

Corresponding author: Guo Lili, Ph. D., Associate Professor, Engineering Research Center of Continuous Extrusion, Ministry of Education, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, P. R. China, Tel: 0086-411-84106527, E-mail: guolili0822@hotmail.com